



MEDITERRANEA DELLE ACQUE spa  
GENOVA

**DIGA DI BADANA**  
**INTERVENTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA**

**PROGETTO DEFINITIVO**  
**Mod. M.INF. DIGHEIDREL Div. V 20/9/2013**

**VOL. 3D**



**STUDIO DI FILTRAZIONE**



**SEMBENELLI**  
CONSULTING

**MEDITERRANEA DELLE ACQUE spa  
GENOVA**

**DIGA DI BADANA**

**INTERVENTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA**

**PROGETTO DEFINITIVO  
Mod. M.INF. DIGHEIDREL Div. V 20/9/2013**

**VOL. 3D**

**STUDIO DI FILTRAZIONE**

Redatto M. Scarella

Approvato P. Sembenelli

Documento F:\1EDIT\BADE\REL\...\Vol 3\R140512-Vol 3D.docx

Data: 12 maggio 2014



## **STRUTTURA DEL DOCUMENTO**

Questo è il **Volume 3D** del **Progetto Definitivo** degli interventi di manutenzione straordinaria che si rendono necessari sulla diga di Badana, uno degli invasi a servizio dell'acquedotto di Genova, in seguito ai dissesti prodottisi nel febbraio 2006.

Il dossier completo del **Progetto Definitivo** è stato redatto in ottemperanza all'Art. 33 del D.P.R. 207/2010 e recepisce le modifiche M.INF. DIGHEIDREL Div. V 20/9/2013. Gli elaborati sviluppati da SC comprendono i seguenti Volumi:

**VOL 1 - Relazione Descrittiva**

**VOL 2 - Elaborati Grafici**

**VOL 3 - Relazioni Tecniche e Specialistiche**

**3A - Relazione Geologica e Geomeccanica**

**3B - Relazione Idrologica**

**3C - Relazione Idraulica**

**3D - Studio di Filtrazione**

**VOL 4 - Calcoli Strutturali**

**VOL 5 - Specifiche Tecniche**

**VOL 6 - Computo Metrico Estimativo**

**VOL 7 - Elenco Prezzi Unitari e Analisi Prezzi**

**VOL 8 - Cronoprogramma**



## INDICE

1	OGGETTO E SCOPO .....		4
2	DEFINIZIONE DEL MODELLO .....		5
2.1	Sezione di Analisi	5	
2.2	Estensione del Modello	5	
2.3	Condizioni Analizzate	5	
2.4	Modello Matematico	6	
2.5	Modello Numerico	7	
2.6	Proprietà dei Materiali	7	
2.7	Condizioni a Contorno	12	
2.8	Calibrazione dei Parametri del Modello	13	
3	RISULTATI DELL'ANALISI .....		14
3.1	Condizione Originaria		14
3.1.1	<i>Superficie Piezometrica</i>	14	
3.1.2	<i>Percorsi di Filtrazione</i>	14	
3.1.3	<i>Portate Filtranti</i>	14	
3.1.4	<i>Pressioni Interstiziali</i>	14	
3.1.5	<i>Gradiente Idraulico</i>	15	
3.2	Condizione di Progetto		15
3.2.1	<i>Superficie Piezometrica</i>	15	
3.2.2	<i>Percorsi di Filtrazione</i>	15	
3.2.3	<i>Portate Filtranti</i>	16	
3.2.4	<i>Pressioni Interstiziali</i>	16	
3.2.5	<i>Gradiente Idraulico</i>	16	
4	SINTESI DEI RISULTATI .....		25



## **1 OGGETTO E SCOPO**

Oggetto del presente documento è lo studio di filtrazione nel corpo diga e nella fondazione della diga di Badana relativa sia alla condizione originaria, ovvero precedente ai dissesti prodottisi nel febbraio 2006, sia alla condizione di progetto successiva agli interventi di manutenzione straordinaria illustrati nel presente Progetto Definitivo.

Scopo dell'analisi è di quantificare le portate filtranti, i gradienti idraulici e le pressioni nella fondazione e nel corpo diga nell'ipotesi di regime stazionario e sotto un carico idraulico massimo di esercizio, ovvero con serbatoio al livello di massima regolazione.

L'analisi di filtrazione rappresenta un utile strumento di supporto per l'interpretazione delle cause che hanno portato al dissesto della diga e per il dimensionamento e la verifica del nuovo schermo di impermeabilizzazione e del nuovo sistema di drenaggio.

La teoria classica della filtrazione è stata applicata ad un modello numerico agli elementi finiti bidimensionale della diga e della fondazione. La soluzione numerica delle equazioni costitutive è stata ottenuta impiegando un algoritmo di calcolo integrato nel software SEEP/W (GEOSTUDIO 2004, GeoSlope International Ltd).

Le informazioni sulla geologia e la topografia del sito, necessarie allo sviluppo del modello, sono state ricavate dai dati raccolti nel corso delle numerose campagne di indagine e delle prove sui materiali ampiamente descritte nelle relazioni geologiche e geotecniche redatte dallo studio TERRA / GET su incarico del gestore Mediterranea delle Acque.

## 2 DEFINIZIONE DEL MODELLO

### 2.1 Sezione di Analisi

L'analisi di filtrazione è stata condotta lungo la sezione trasversale maestra indicata con progressiva 120.20 nel disegno di Progetto, BADE-3103.

La sezione di analisi offre un campo di indagini significativo in quanto, nella condizione di progetto, è caratterizzata dal maggior sviluppo in altezza del corpo diga, circa 56.4 m, e dal maggior carico idrostatico sul paramento di monte, circa 51.5 m alla base.

Nelle vicinanze della sezione di analisi è stata raccolta una grande quantità di dati sulla geologia e sulla permeabilità dell'ammasso roccioso e del corpo murario, inoltre, è disponibile un buon numero di letture delle quote piezometriche registrate da 2 piezometri elettrici, installati alla base del corpo diga e nella fondazione, lungo un periodo di tempo di circa 6 anni. Tutte queste informazioni sono state utilizzate nella fase di calibrazione dei parametri geotecnici del modello.

### 2.2 Estensione del Modello

La geometria del modello è stata definita sulla base dei più recenti rilievi topografici effettuati da TECMA nel 2008 e delle informazioni contenute nei documenti originali della diga.

La forma e la dimensione del corpo diga sono stati riprodotti con buona precisione. Particolare attenzione è stata posta nella definizione del contatto tra fondazione e corpo diga per la quale sono stati utilizzati i risultati dei sondaggi esplorativi.

I limiti del modello si estendono a monte e a valle dell'asse diga per circa 65 m e in profondità nella roccia di fondazione per circa 45 m. L'area modellata, con una superficie complessiva di circa 6500 m<sup>2</sup>, è sufficientemente ampia da rendere gli effetti di bordo trascurabili.

### 2.3 Condizioni Analizzate

Sono state analizzate due distinte condizioni:

- a. *Condizione originaria*, Fig. 2/1: la geometria della diga è quella precedente ai dissesti prodottisi nel febbraio 2006. Nella fondazione è assente lo schermo di impermeabilizzazione e la cortina di dreni, nel corpo diga è assente un sistema di drenaggio delle portate filtranti;
- b. *Condizione di progetto*, Fig. 2/2: la geometria della diga è quella definita dal progetto di risanamento. Il progetto prevede la costruzione di uno spessore addizionale di calcestruzzo in aderenza sia al paramento di monte sia al paramento di valle della diga. Il

nuovo rinforzo in calcestruzzo, in sostanza, incapsula la muratura esistente e sopraeleva il coronamento di circa 4 m. Lungo il piede di monte e di valle della diga verranno realizzati due cunicoli di ispezione, dove andrà ad intestarsi uno schermo profondo di impermeabilizzazione e andrà a recapitare un sistema di dreni perforati nella fondazione. Una serie di canne drenanti verticali, inserite nel nuovo spessore in aderenza al paramento di monte, consentirà il drenaggio delle portate filtranti nel corpo diga verso il cunicolo di monte.

In entrambe le condizioni analizzate è stato assunto un regime di filtrazione stazionario che si traduce in un'ipotesi di carico idraulico costante. Questa ipotesi ha permesso di modellare la risposta a lungo termine del sistema e dunque di valutare gli effetti di un processo di filtrazione completamente sviluppato.

#### 2.4 Modello Matematico

L'analisi di filtrazione si basa sull'applicazione della teoria classica di Darcy. Non rientra negli obiettivi del presente documento approfondire gli aspetti di detta teoria, per maggiori dettagli si rimanda dunque a testi specifici tra i quali citiamo "*Seepage, Drainage and Flow Nets*", H.R. Cedergren (1976).

La legge di Darcy definisce la filtrazione in un mezzo poroso saturo nella seguente forma:

$$q = k \cdot i$$

dove  $q$  = portata specifica ( $m^2/s$ ),  $k$  = permeabilità del mezzo poroso ( $m/s$ ),  $i$  = gradiente del carico idraulico totale ( $m/m$ ).

Il carico idraulico totale rappresenta la principale incognita del problema che, nell'ipotesi di continuo bidimensionale, viene esplicitata dalla seguente equazione di continuità in forma differenziale:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

dove  $k_x$  e  $k_y$  sono i coefficienti di permeabilità nelle due direzioni planari ortogonali ( $m/s$ ) e  $h$  è il carico idraulico totale ( $m$ ), somma di carico potenziale e carico di pressione.

Si precisa che tale equazione è valida limitatamente all'ipotesi di fluido monofasico incompressibile in condizioni di regime di moto laminare e di suolo o roccia porosa.

## 2.5 Modello Numerico

La soluzione dell'equazione di Darcy è stata ottenuta con uno schema numerico alle differenze finite. Il problema numerico consiste nella ricerca di una funzione  $h(x,y)$  che soddisfi l'equazione di Darcy all'interno di una regione dai contorni fissi e lungo i quali le condizioni di flusso o di carico siano note (problema alle condizioni a contorno).

La soluzione del problema numerico impone la discretizzazione della geometria in elementi finiti (Mesh). La mesh del modello è composta da elementi isoparametrici triangolari e rettangolari che compongono una fitta rete di punti ciascuno dei quali rappresenta un nodo incognito nel sistema di equazioni differenziali.

La discretizzazione, o meshing, deve rispondere a due requisiti opposti: da un lato la rappresentazione accurata della geometria del modello (elementi ragionevolmente piccoli), dall'altro un'accettabile velocità nei tempi di elaborazione (elementi più grandi, per ridurre il numero complessivo). Il bilancio tra prestazione di calcolo e accuratezza della soluzione ha condotto alla scelta di una mesh omogenea con distanza media tra i nodi di circa 2 m.

La soluzione del problema numerico è stata ottenuta utilizzando il codice di calcolo integrato nel software SEEP/W, distribuito da GEOSTUDIO (2004), GeoSlope International Ltd. Il metodo risolutivo, sviluppato da Barrel e al. (1994), si basa sulla soluzione del sistema di equazioni differenziali con un'integrazione gaussiana.

## 2.6 Proprietà dei Materiali

Le caratteristiche geotecniche dei materiali impiegati nel modello numerico sono state stimate analizzando le informazioni geologiche e geomeccaniche ottenute nel corso delle campagne esplorative.

In prossimità della sezione oggetto di indagine sono stati eseguiti 7 sondaggi esplorativi (si veda la tavola BADR-2043):

- n° 2 sondaggi nel 1997: *S1* e *S2*;
- n° 4 sondaggi eseguiti da TERRA nel 2000: *Sba-ch1*, *Sba-ch2*, *Sba1* e *Sba2*;
- n° 3 sondaggi eseguiti da TERRA nel 2007: *BH10*, *BH9*, *BH11*;
- n° 3 sondaggi eseguiti da GET nel 2013: *S7*, *S8*, *S9*.

Le prove Lugeon effettuate nei fori di sondaggio evidenziano assorbimenti generalmente modesti (< 5 UL) salvo in alcune tratte di foro dove sono più consistenti, fino a circa 50 UL. In particolare l'assorbimento è molto elevato (40-50 UL) al contatto tra muratura e roccia di fondazione per un tratto che si estende in profondità nella roccia per circa 5-10 m. Le prove Lugeon nei tratti di muratura hanno evidenziato un assorbimento medio di circa 3-4 UL.



Le prove radar effettuate nei fori sul paramento (*BH10*, *BH9*) evidenziano una zona di forte ampiezza di riflessione a circa 20 m di profondità, in coincidenza con il substrato roccioso probabilmente alterato nei primi metri al di sotto della fondazione del corpo diga.

Nello studio geologico sono stati definiti l'orientamento e la persistenza delle discontinuità dell'ammasso roccioso. I principali piani di fratturazione hanno inclinazione sub-verticale ed orientamento prevalente S-N, ovvero ortogonale all'asse diga. La persistenza è prevalentemente media (3-10 m) o alta (10-20 m). L'osservazione delle carote di roccia indica una decisa prevalenza di giunti chiusi o leggermente aperti, con un'alta percentuale di giunti suturati da ricristallizzazioni.

La permeabilità del corpo diga e dell'ammasso roccioso è stata stimata analizzando gli assorbimenti delle prove Lugeon (1 UL  $\sim 0.6e^{-7}$  m/s) nei fori di sondaggio. Il risultato delle prove Lugeon ha fornito una buona indicazione della permeabilità media dell'ammasso.

Osservando che la direzione prevalente delle superfici di discontinuità nella roccia di fondazione è parallela alla sezione di analisi, ovvero ortogonale all'asse diga, e con inclinazione sub-verticale, il valore di permeabilità media della roccia è stato amplificato in direzione verticale adottando uno specifico coefficiente di anisotropia. Analogamente, al fine di simulare l'effetto indotto dalla stratificazione del nuovo getto in calcestruzzo e dalla presenza di fessurazioni sub-orizzontali prodotte dallo stato tensionale nella muratura esistente, è stato introdotto un coefficiente di anisotropia che esalta la filtrazione nel corpo diga in direzione orizzontale.

In accordo con i risultati delle indagini la geometria è stata suddivisa in 3 zone principali, nelle Figg. 2/1 e 2/2 è illustrata la distribuzione dei materiali nel modello:

1. Roccia di buona qualità. Caratterizza l'ammasso roccioso nelle regioni lontane dalla fondazione della diga, in profondità al disotto della fondazione ( $>10$  m). Permeabilità media  $3 \times 10^{-5}$  cm/s.
2. Roccia di qualità scadente. Caratterizza l'ammasso roccioso al contatto con la fondazione del corpo diga nei primi 7-10 m di profondità. Permeabilità media  $8 \times 10^{-4}$  cm/s.
3. Corpo diga. Caratterizza gli elementi del corpo diga realizzati in muratura di pietrame e malta (corpo diga originario). Permeabilità media  $6 \times 10^{-6}$  cm/s.

Per una corretta definizione del problema nella condizione di progetto sono state inoltre modellate le nuove opere realizzate in calcestruzzo: sovrizzo del coronamento, placca su entrambi i paramenti, trattamento di consolidamento alla base dei paramenti e nuove opere di impermeabilizzazione e drenaggio, ovvero schermo di iniezioni, dreni in fondazione e canne drenanti.



Le proprietà intrinseche del calcestruzzo strutturale sono state modellate assumendo un minimo grado di invecchiamento al fine di valutare la risposta dell'opera a lungo termine. La permeabilità media dei calcestruzzi è stata definita pari a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, valore generalmente atteso per un getto di buona qualità.

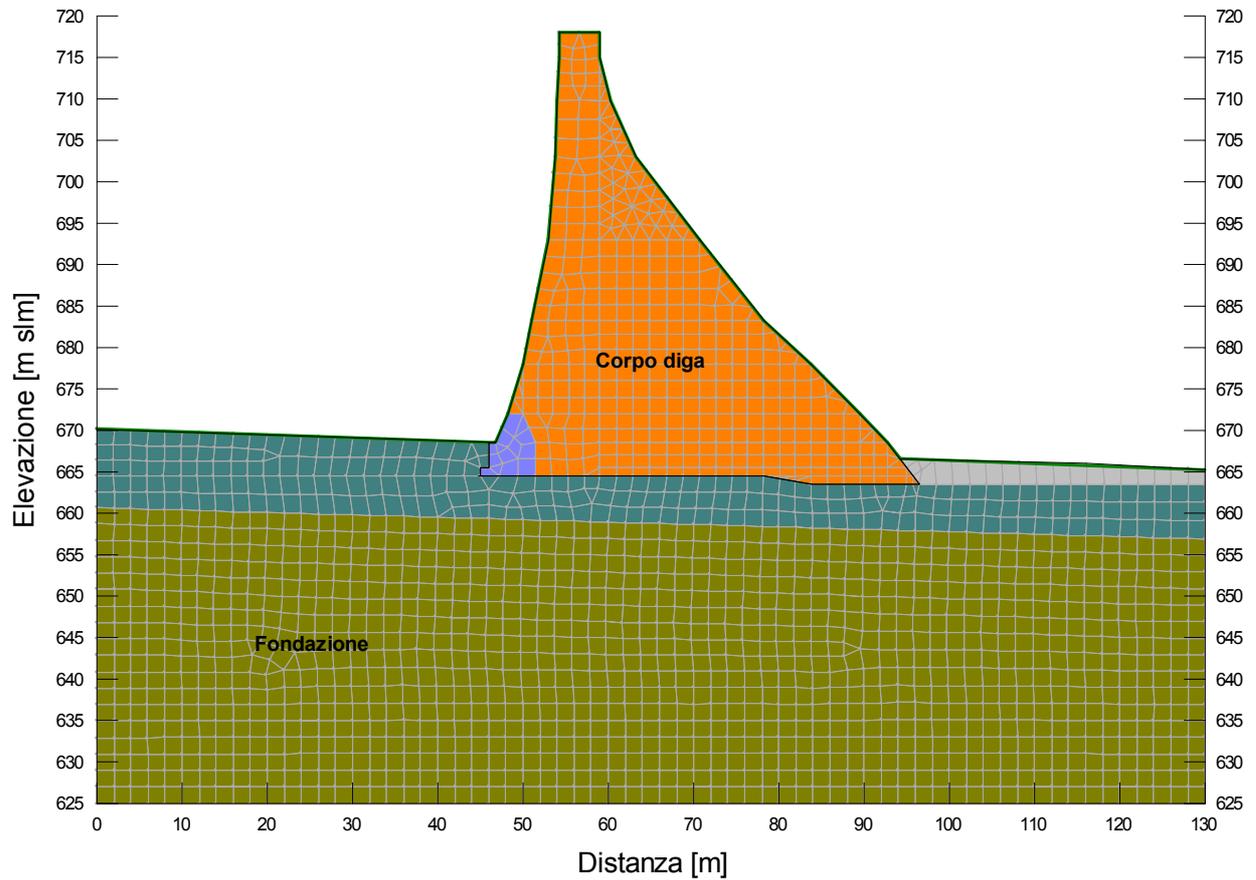
La permeabilità dello schermo di iniezione è variabile in funzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali trattati, analoghi esempi di trattamento profondo della fondazione indicano un valore di permeabilità compreso mediamente tra  $1 \times 10^{-7}$  e  $1 \times 10^{-8}$  cm/s. Nel corso della fase esecutiva dei lavori di manutenzione della diga verrà pianificata una serie di prove specifiche in sito, propedeutiche al trattamento di iniezione, finalizzate alla stima dell'efficacia dello schermo nella roccia di fondazione. Generalmente si eseguono prove di assorbimento Lugeon alle varie profondità del trattamento. Nell'ottica di fornire un'interpretazione cautelativa del comportamento dello schermo di iniezione, in prima approssimazione è stato assunto un valore di permeabilità medio di  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, più accurate informazioni circa l'effettiva efficacia dello schermo giungeranno dunque all'avvio della fase esecutiva dei lavori.

A valle del piede diga l'affioramento superficiale in corrispondenza della sezione di analisi (fondovalle) è costituito da un debole strato di materiali grossolani (sassi e ghiaia di generose dimensioni) approssimativamente dello spessore medio di 1-2 m. Questo strato è stato modellato con una permeabilità media di  $1 \times 10^{-3}$  cm/s.

Nella condizione originaria è stato inoltre introdotta una porzione della muratura esistente particolarmente fratturata e permeabile localizzata al piede di monte del corpo diga. Questa zona trova corrispondenze nello stato tensionale della muratura. La permeabilità è stata assunta pari a  $1 \times 10^{-3}$  cm/s.

Tab. 2/1 – Permeabilità satura dai materiali impiegati nel modello.

Elemento del modello	Permeabilità satura <i>cm/s</i>	Anisotropia <i>Kv/Kh</i>
Roccia di buona qualità	$3 \times 10^{-5}$	1.2
Roccia di qualità scadente	$8 \times 10^{-4}$	1.3
Muratura esistente	$6 \times 10^{-6}$	0.8
Calcestruzzo strutturale	$1 \times 10^{-7}$	0.7
Schermo di iniezioni	$1 \times 10^{-7}$	1
Consolidamento della roccia	$1 \times 10^{-6}$	1
Piede di valle (strato superficiale)	$1 \times 10^{-3}$	1

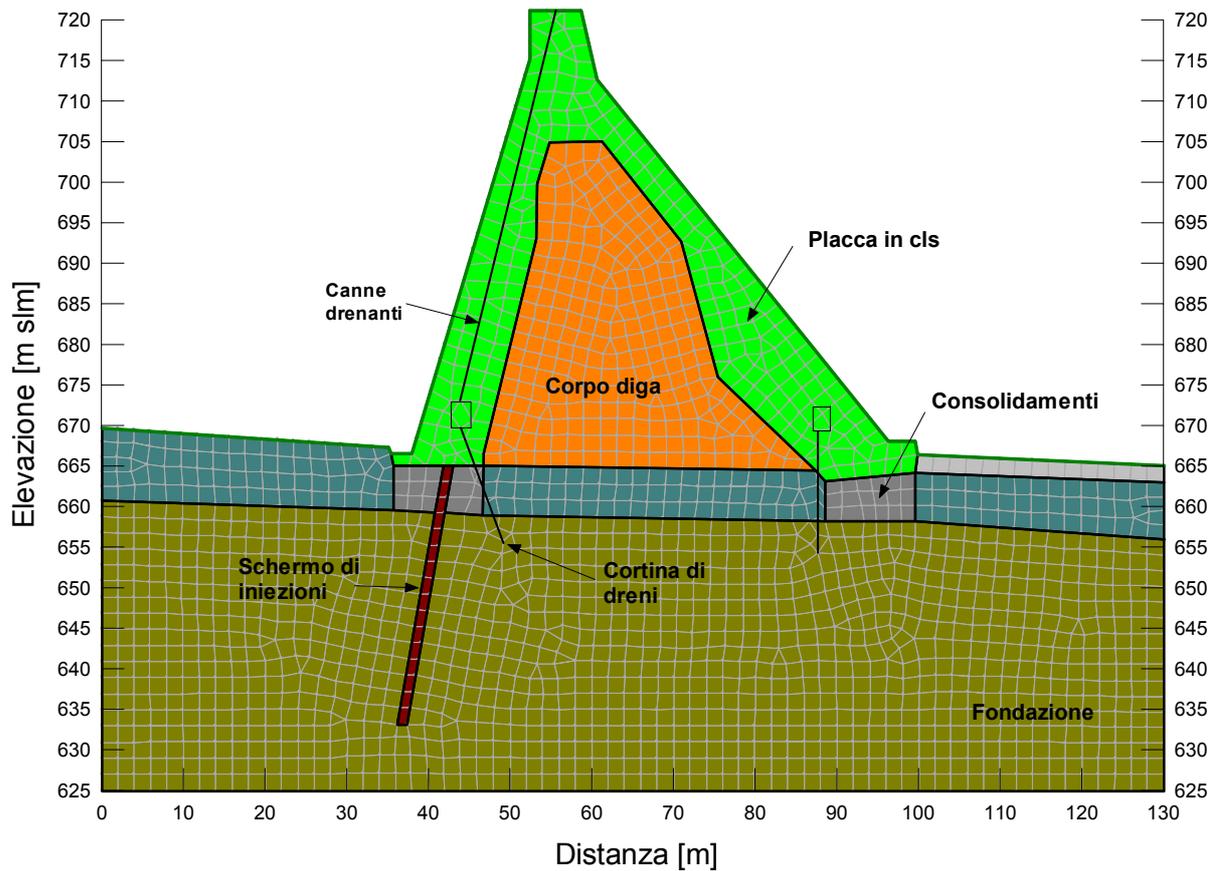


**Legenda:**

- marrone** = ammasso roccioso di buona qualità,
- verde scuro** = ammasso roccioso di qualità scadente,
- viola** = piede di monte (muratura fessurata)
- arancio** = corpo diga, muratura esistente
- grigio** = materiale superficiale

Spaziatura Mesh del modello = 2 m

Fig. 2/1 – Studio di Filtrazione. Geometria e distribuzione dei materiali del modello numerico nella *condizione originaria*.



**Legenda:**

- marrone** = ammasso roccioso di buona qualità,
- verde scuro** = ammasso roccioso di qualità scadente,
- arancio** = corpo diga;
- grigio** = materiale superficiale;
- verde chiaro** = calcestruzzo strutturale;
- rosso** = schermo di iniezioni
- grigio scuro** = trattamento di consolidazione

Spaziatura Mesh del modello = 2 m

Fig. 2/2 – Studio di Filtrazione. Geometria e distribuzione dei materiali del modello numerico nella *condizione di progetto*.

## 2.7 Condizioni a Contorno

Le condizioni a contorno identificano le azioni esterne del problema numerico e consistono in condizioni di carico idraulico applicato lungo i confini del modello.

Le condizioni a contorno considerate sono le seguenti:

- Sul fondo del serbatoio e sul paramento di monte della diga è stato assegnato un carico idraulico costante (somma della quota e della pressione) pari alla quota geodetica della superficie del lago al livello di massima regolazione. Tale carico si differenzia a seconda della condizione analizzata:
  - a. *condizione originaria*: livello di massima regolazione 716.9 m slm;
  - b. *condizione di progetto*: livello di massima regolazione 718.0 m slm.
- Sul fondovalle ai piedi della diga è stato assegnato un carico idraulico pari alla quota geodetica del terreno. Considerato che il terreno a valle della diga presenta una debole pendenza, tale condizione a contorno si traduce in un carico di pressione nullo, ovvero pressione assoluta pari alla pressione atmosferica.
- Sul paramento di valle della diga, essendo la superficie piezometrica un'incognita del problema, non è possibile definire a priori uno stato di sollecitazione del modello. Potenzialmente la superficie piezometrica può affiorare dal paramento di valle ad una certa altezza. Congruamente, il paramento di valle non può essere modellato come una frontiera impermeabile. Il software SEEP/W permette di modellare le situazioni in cui la superficie piezometrica è incognita e può affiorare come sorgente sospesa con una particolare condizione a contorno detta “*potential seepage review face*”. Una volta selezionata questa condizione il risolutore determina la posizione della superficie piezometrica per successivi tentativi fino ad ottenere la completa convergenza della soluzione. Questa ipotesi è stata considerata per entrambe le condizioni analizzate (*originaria* e *di progetto*).
- Per simulare l'effetto di suzione dei nuovi dreni nella fondazione della diga (*condizione di progetto*) è stata definita una condizione a contorno puntuale applicata ai nodi della mesh disposti lungo l'asse del drenio. La condizione a contorno corrisponde alla pressione idrostatica, ovvero un carico totale costante (somma della quota e della pressione) pari alla quota del cunicolo di ispezione nel quale recapitano i dreni.
- Il contributo delle canne drenanti (*condizione di progetto*) è stato modellato con una condizione a contorno puntuale applicata ai nodi della mesh disposti lungo l'asse delle canne. La condizione a contorno corrisponde ad un carico di pressione nullo, ovvero ad una pressione assoluta pari alla pressione atmosferica.



## 2.8 Calibrazione dei Parametri del Modello

Le proprietà geotecniche dei materiali sono state calibrate mettendo a confronto i risultati del modello numerico nella *condizione originaria* con le misure registrate dai piezometri installati nel corpo diga e in fondazione. In prossimità della sezione di analisi sono installati 2 piezometri elettrici, denominati SBA1-P1 e SBA1-P2, rispettivamente installati nella fondazione al contatto con la muratura e alla base del corpo diga.

Nell'analisi comparativa sono state considerate le misure piezometriche sincrone registrate dai piezometri in corrispondenza del massimo livello raggiunto nei 3 ultimi cicli di invaso: 2004, 2005 e 2006. Sfruttando la flessibilità del modello è stato possibile modificare le proprietà dei singoli materiali, nonché la loro ripartizione nella geometria, allo scopo di riprodurre con sufficiente accuratezza il processo di filtrazione reale.

I risultati della calibrazione del modello hanno evidenziato alcuni aspetti singolari del flusso di filtrazione:

- l'ammasso roccioso al contatto con la fondazione dimostra una permeabilità sensibilmente maggiore di quella dell'ammasso circostante, circa 1 ordine di grandezza. Questa caratteristica è in accordo con i risultati dalle prove Lugeon effettuate nei fori di sondaggio e conferma la presenza di una fascia nella fondazione con qualità geomeccaniche scadenti;
- la muratura del piede di monte della diga sembra avere una permeabilità di circa mezzo ordine di grandezza maggiore di quella mediamente stimata nel corpo diga (muratura al piede di monte,  $1 \times 10^{-3}$  cm/s, muratura del corpo diga,  $8 \times 10^{-4}$  cm/s). Questa ipotesi pare ragionevole e può essere spiegata ammettendo l'esistenza di una zona al contatto con la fondazione sottoposta ad uno stress tensionale di trazione associata alla presenza di ampie fessure nella muratura.

## 3 RISULTATI DELL'ANALISI

### 3.1 Condizione Originaria

I risultati del modello numerico nella *condizione originaria* sono riassunti nei seguenti punti.

#### 3.1.1 Superficie Piezometrica

La superficie piezometrica all'interno del corpo diga ha una forma distesa ed è localizzata all'incirca alla stessa quota dell'invaso. La linea di saturazione emerge dal paramento di valle circa a quota 714 m slm. Le perdite di carico nel corpo diga sono decisamente modeste. L'intero corpo diga è dunque in condizioni sature.

#### 3.1.2 Percorsi di Filtrazione

Le perdite di carico idraulico, rappresentate dall'andamento delle linee equipotenziali a carico costante (Fig. 3/1), sono distribuite secondo un andamento regolare sia nella fondazione sia nel corpo diga.

I flussi di filtrazione più importanti si osservano nell'ammasso roccioso nella zona di contatto tra fondazione e corpo diga dove, per effetto della maggior permeabilità, si raccolgono le portate più consistenti.

#### 3.1.3 Portate Filtranti

La muratura del corpo diga è attraversata da un flusso di filtrazione non trascurabile, il volume d'acqua specifico che emerge dal paramento di valle è stimato in circa 0.22 l/min /m.

La portata specifica totale, stimata al piede diga e somma dunque della portata filtrante dal paramento e nella fondazione, è pari a circa 3.13 l/min /m.

#### 3.1.4 Pressioni Interstiziali

La misura più significativa delle pressioni riguarda il contatto tra corpo diga e fondazione. L'andamento delle pressioni al contatto ha la tipica forma triangolare che caratterizza una fondazione non adeguatamente schermate e drenata (Fig. 3/3).

I valori di pressione sono elevati e denotano una situazione non ottimale. Al piede di monte della diga la pressione è pari a 500 kPa e decresce linearmente in direzione del piede di valle dove la pressione residua è ancora superiore a 50 kPa.

### **3.1.5 Gradiente Idraulico**

La distribuzione dei gradienti idraulici evidenzia due zone nelle quali si concentrano i valori più significativi: al piede di monte e al piede di valle, prevalentemente nella muratura esistente e in parte al contatto con la fondazione (Fig. 3/4).

I gradienti più elevati sono localizzati nella muratura del piede di valle al contatto con il paramento, i risultati del modello evidenziano valori puntuali anche superiori a 3 m/m. Questo risultato trova una ragionevole spiegazione nell'analisi dell'andamento dei percorsi di filtrazione nell'ammasso roccioso al contatto tra fondazione e corpo diga dove, per effetto della maggior permeabilità, il carico idraulico non viene adeguatamente dissipato e i flussi di filtrazione, attraversando la muratura del sottile piede di valle, sono necessariamente associati ad un rapido rilascio dell'alto carico residuo.

## **3.2 Condizione di Progetto**

I risultati del modello numerico nella *condizione di progetto* sono riassunti nei seguenti punti.

### **3.2.1 Superficie Piezometrica**

Le canne drenanti in prossimità del paramento di monte richiamano i flussi filtranti e determinano una disposizione della superficie piezometrica con orientamento verticale lungo l'asse delle stesse. A valle delle canne drenanti la superficie piezometrica si localizza poco sopra la fondazione della diga, con una forma distesa leggermente pendente verso valle, tra le quote 668 (cunicolo di ispezione) a monte e 666 a valle (piede diga).

Il corpo diga è in gran parte asciutto ad eccezione di una ridotta porzione della muratura al contatto con la fondazione, circa il 5 % del volume complessivo. L'intero paramento di valle è asciutto, la superficie piezometrica emerge dal piede diga a livello del terreno.

### **3.2.2 Percorsi di Filtrazione**

Osservando l'andamento delle linee equipotenziali a carico totale costante (Fig. 3/5) risulta evidente che le più importanti perdite di carico sono concentrate nello schermo di iniezione. Lo schermo produce di fatto una dissipazione del carico idraulico quasi completa, la differenza di carico a monte e a valle dello schermo è pari a circa 45-50 m.

I percorsi di filtrazione si concentrano al di sotto dello schermo di iniezione, in profondità nella roccia di fondazione. La lunghezza dei percorsi di filtrazione si allunga in misura considerevole determinando una netta diminuzione della portata filtrante. Lo schermo di dreni nel cunicolo di monte, richiamando i flussi filtranti e piegando le linee di flusso, contribuisce attivamente alla dissipazione del carico residuo. Le poche portate filtranti residue vengono infine convogliate verso la linea di dreni che recapita nel cunicolo di valle.

Si fa notare che la filtrazione nel corpo diga è pressoché assente.

### **3.2.3 Portate Filtranti**

La portata intercettata dai dreni in fondazione è pari a circa 0.22 l/min /m per il cunicolo di monte e pari a circa 0.06 l/min /m per il cunicolo di valle. La portata intercettata dalle canne drenanti è stimata in circa 0.02 l/min /m.

La portata di filtrazione totale raccolta come somma dei dreni + canne drenanti risulta pari a circa 0.3 l/min /m. Tale valore è inferiore di un ordine di grandezza rispetto alla condizione originaria.

La portata residua, misurata al piede di valle della diga e non intercettata dai sistemi di drenaggio della diga, è pari a circa 0.06 l/min /m.

### **3.2.4 Pressioni Interstiziali**

Le linee equipotenziali a pressione costante nella fondazione a valle dello schermo di iniezioni sono disposte secondo un allineamento circa orizzontale (Fig. 3/6), ovvero parallelamente al profilo del contatto.

Le pressioni residue al contatto tra fondazione e corpo diga sono circa costanti e si attestano su valori mediamente bassi. Immediatamente a valle dello schermo di iniezione la pressione rilevata è pari a circa 30 kPa, mentre in corrispondenza del piede di valle è pari a circa 25 kPa.

### **3.2.5 Gradiente Idraulico**

La distribuzione dei gradienti idraulici nella fondazione mostra una concentrazione dei valori più significativi nello schermo di iniezione. Questo risultato è una conferma dell'efficacia dello schermo di tenuta (Fig. 3/8).

I gradienti alla base del corpo diga e nella fondazione a valle dello schermo sono mediamente bassi con valori non superiori a 0.1 m/m.

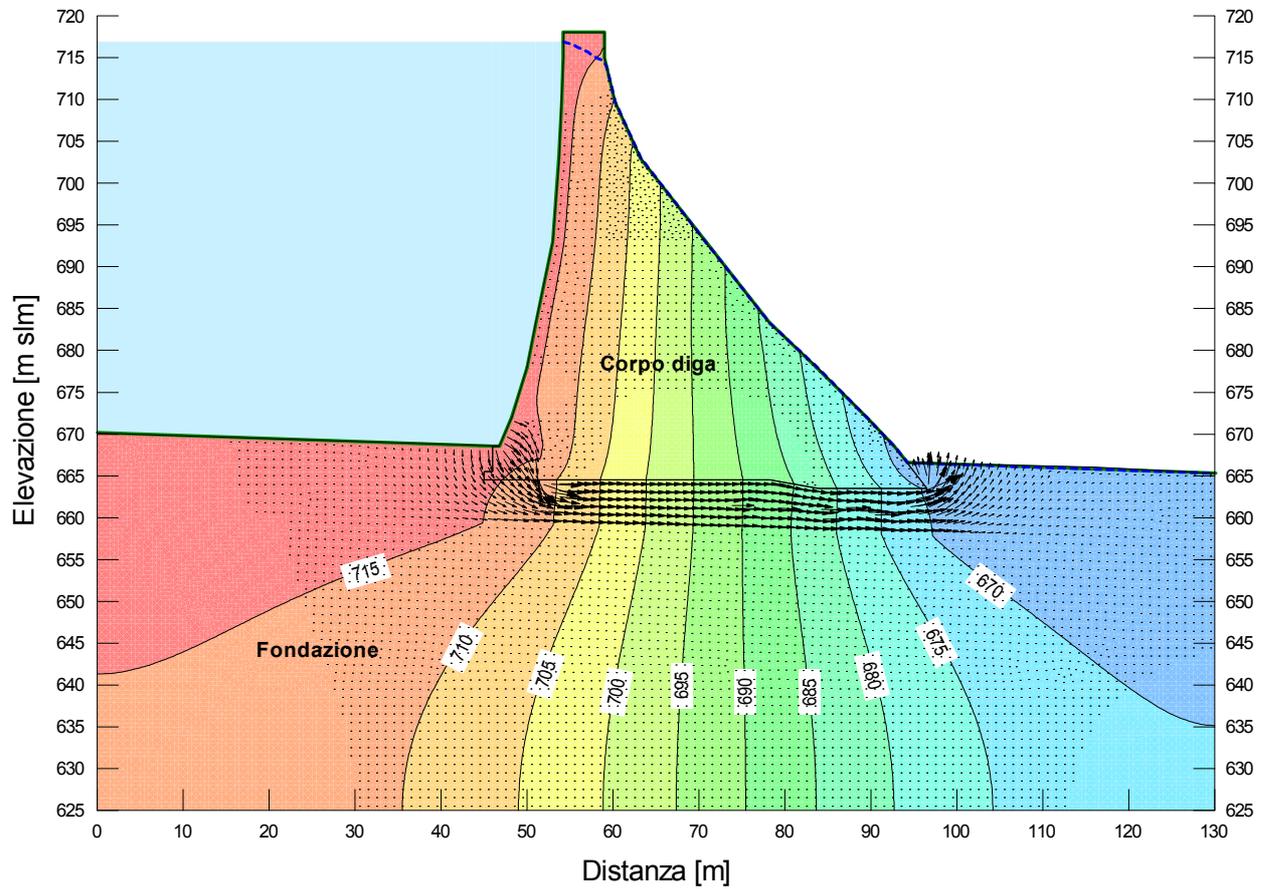


Fig. 3/1 – Studio di Filtrazione. Linee equipotenziali a carico totale costante (m) e vettori di flusso (magnitudine), *condizione originaria*.

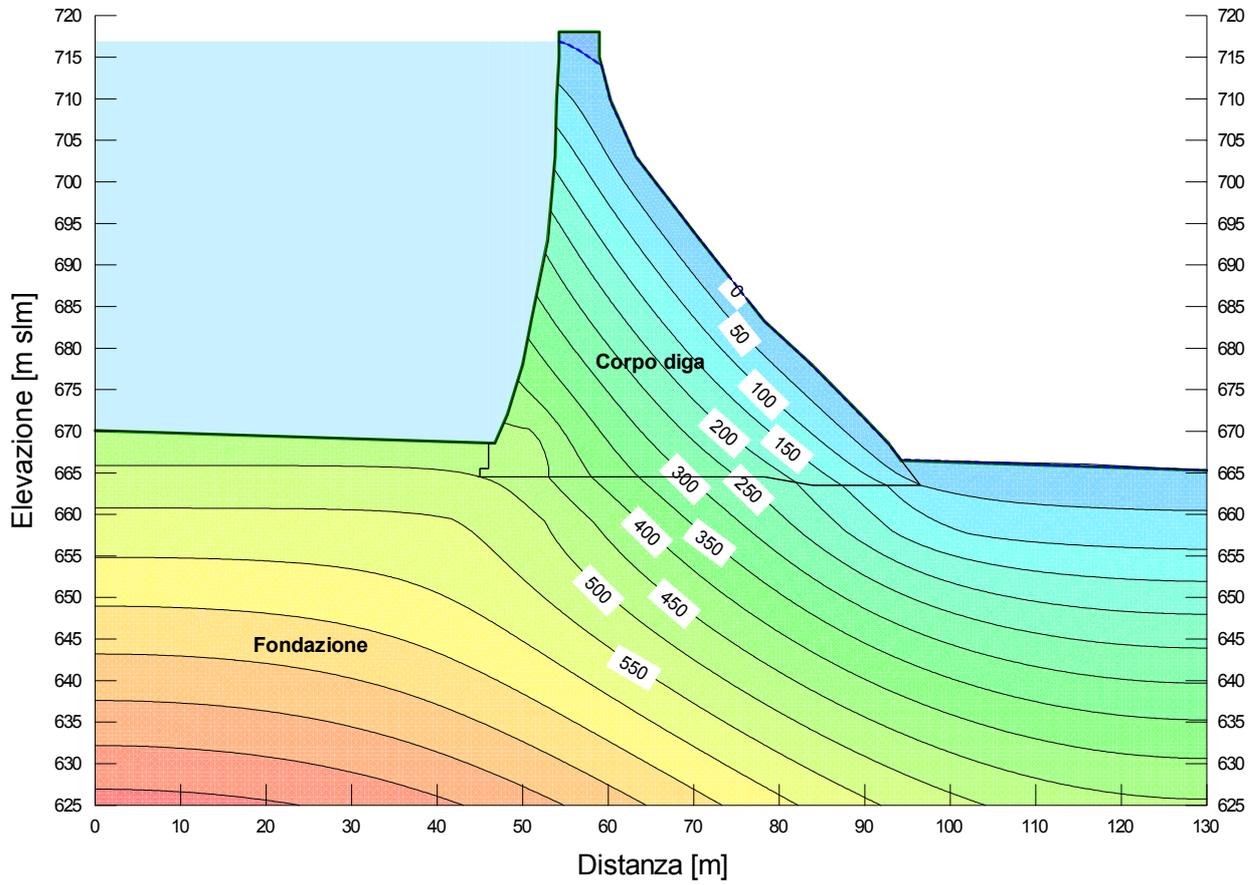


Fig. 3/2 – Studio di Filtrazione. Linee equipotenziali a pressione costante (kPa), *condizione originaria*.

**Sottropresioni lungo la fondazione diga  
Geometria Originaria**

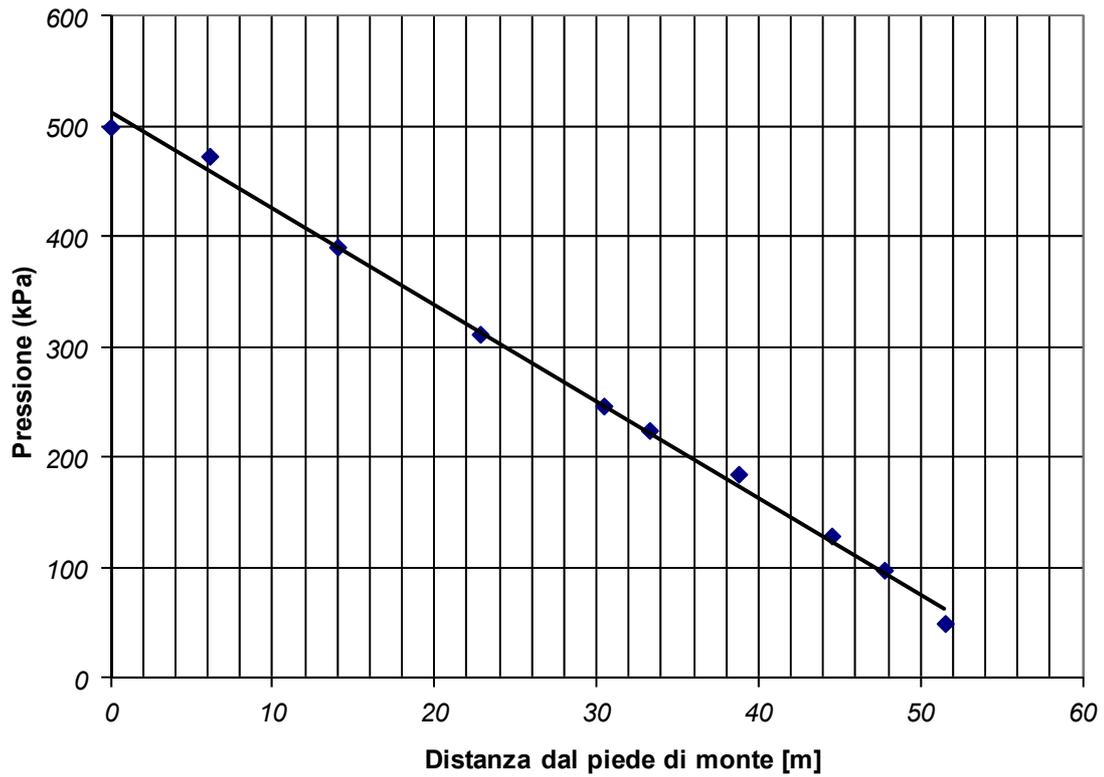


Fig. 3/3 – Studio di Filtrazione. Andamento delle pressioni al contatto tra fondazione e corpo diga, *condizione originaria*.

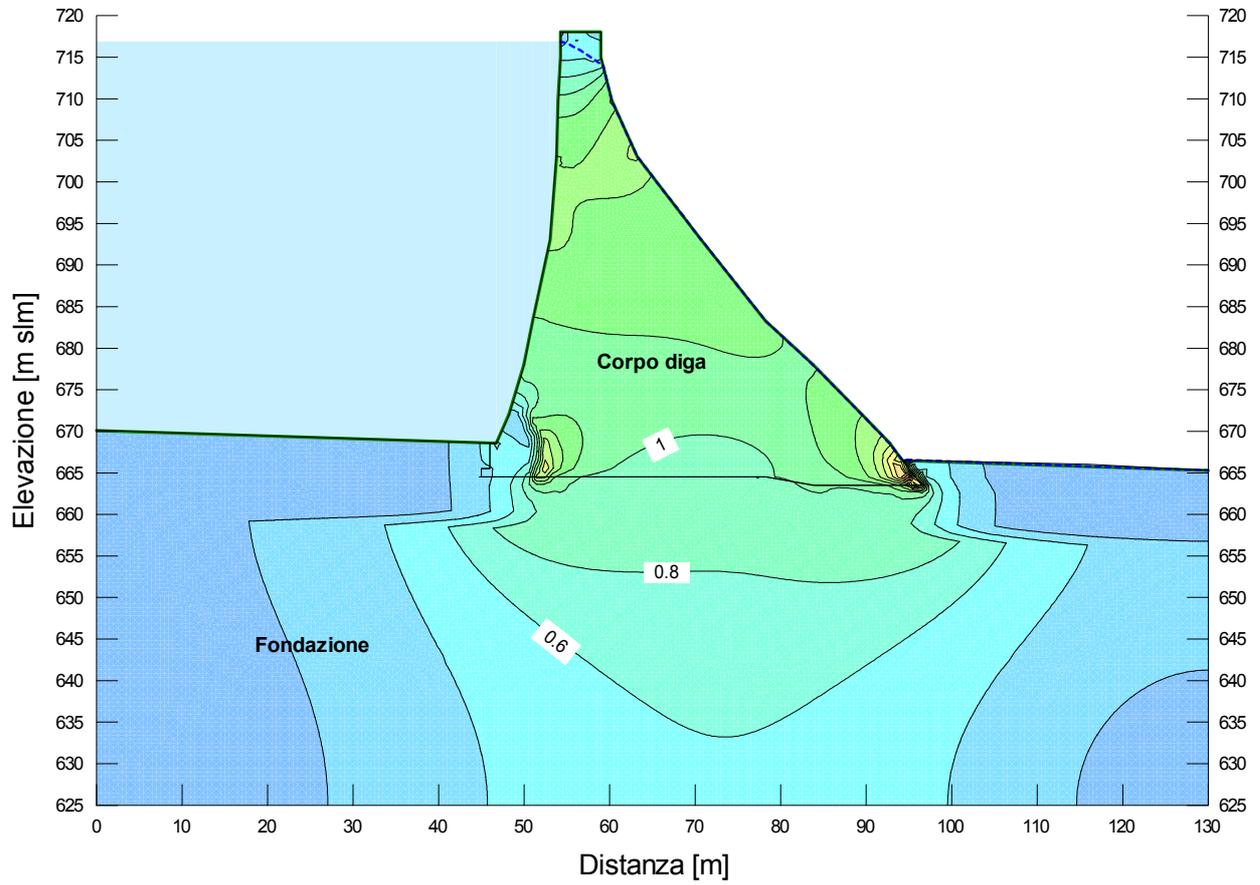


Fig. 3/4 – Studio di Filtrazione. Linee equipotenziali a gradiente costante (m/m), *condizione originaria*.

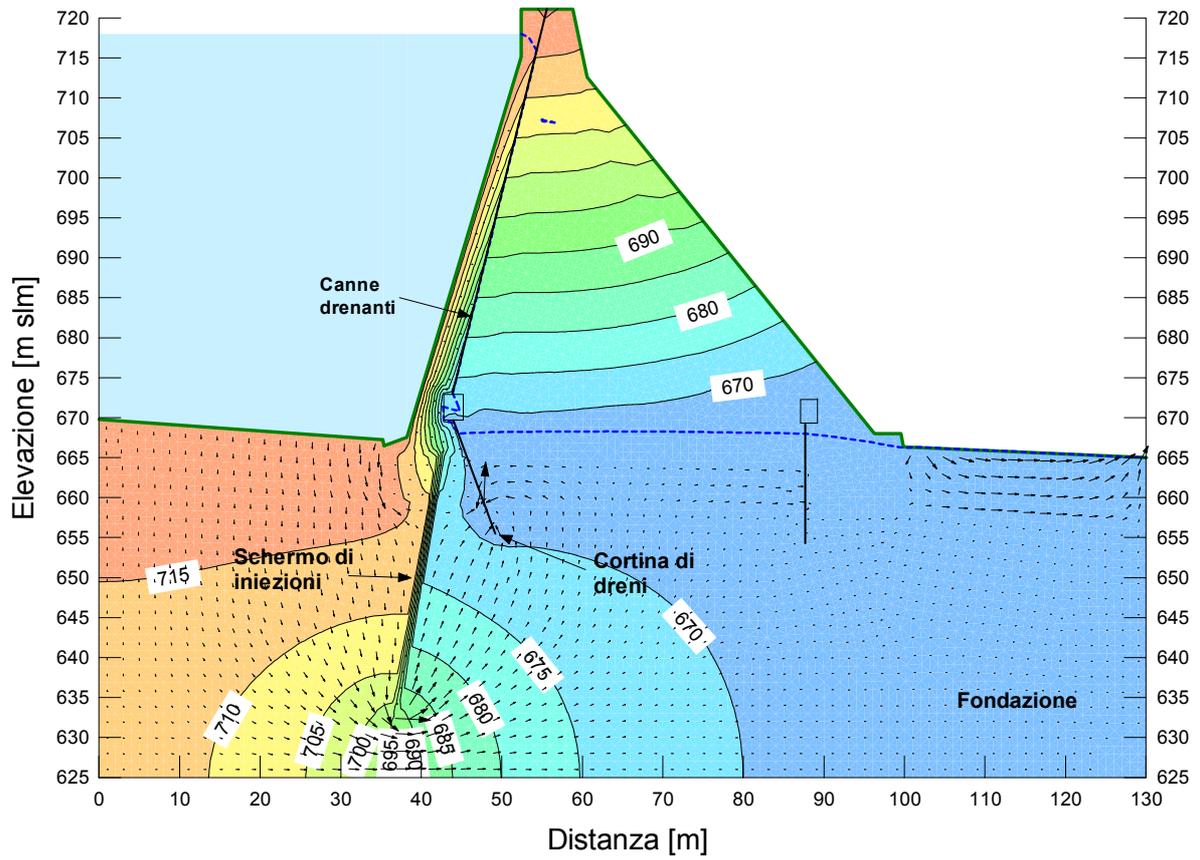


Fig. 3/5 – Studio di Filtrazione. Linee equipotenziali a carico totale costante (m) e vettori di flusso (magnitudine), *condizione di progetto*.

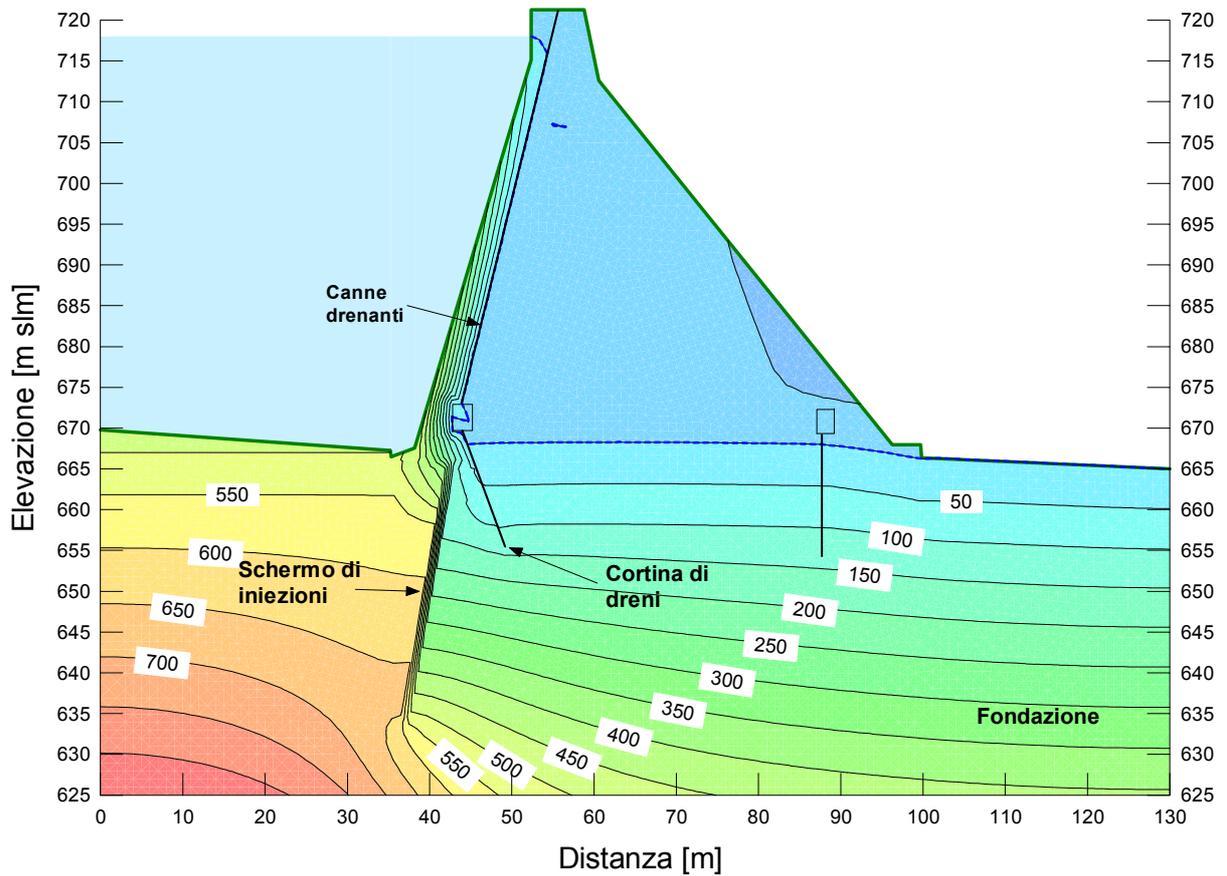


Fig. 3/6 – Studio di Filtrazione. Linee equipotenziali a pressione costante (kPa), *condizione di progetto*.

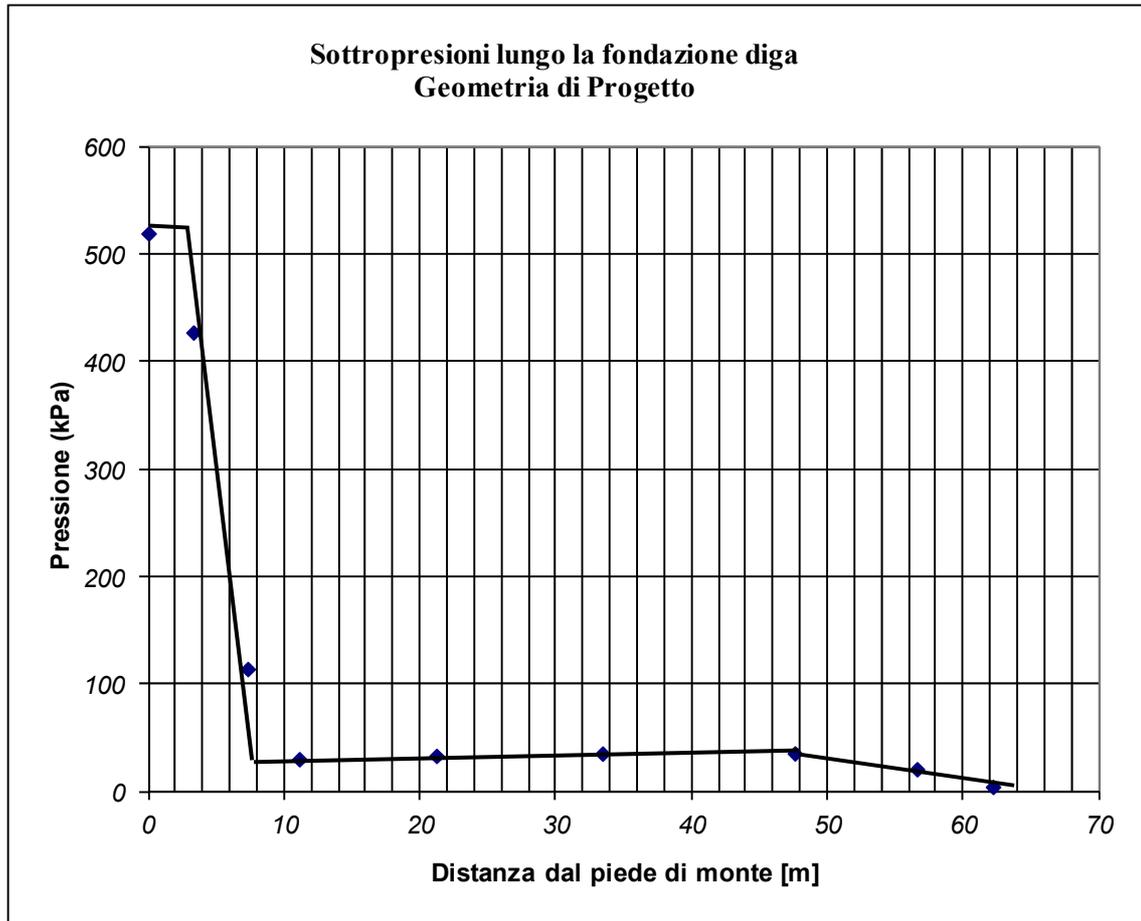


Fig. 3/7 – Studio di Filtrazione. Andamento delle pressioni al contatto tra fondazione e corpo diga, *condizione di progetto*.

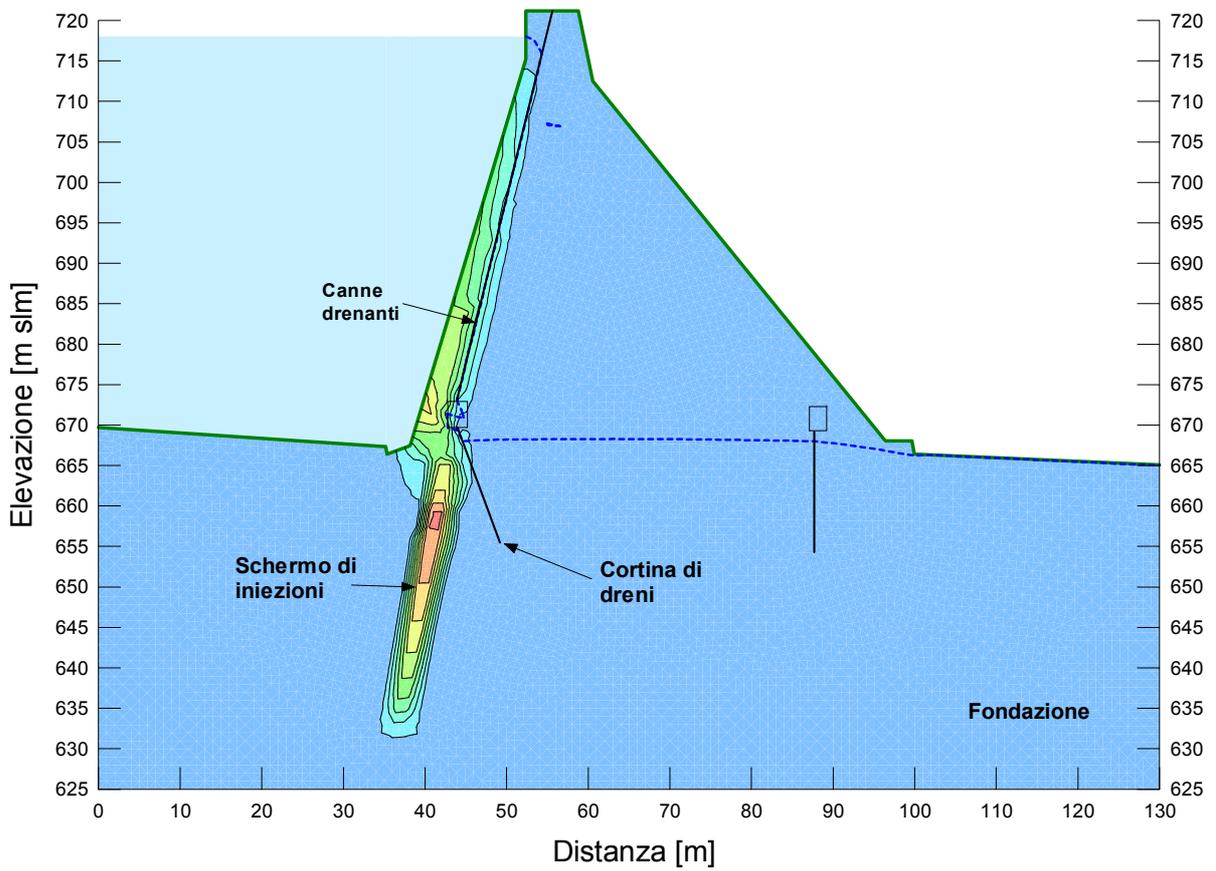


Fig. 3/8 – Studio di Filtrazione. Andamento dei gradienti idraulici, *condizione di Progetto*.

## 4 SINTESI DEI RISULTATI

L'analisi di filtrazione nel corpo diga e nella fondazione della diga di Badana, seppur nei limiti del modello numerico utilizzato, fornisce risultati soddisfacenti e coerenti con le misure registrate dagli strumenti della diga.

I risultati più importanti dell'analisi di filtrazione riguardano il confronto tra il regime idraulico della diga nella condizione originaria e quello nella condizione di progetto. I principali benefici apportati dagli interventi di manutenzione straordinaria si possono riassumere nei seguenti aspetti:

- Eliminazione della filtrazione nel corpo murario della diga. La superficie piezometrica nella *condizione originaria* è localizzata pressoché alla stessa quota del vicino serbatoio, il corpo diga è dunque sempre in condizioni sature. La placca in calcestruzzo a bassa permeabilità sul paramento di monte, unitamente al contributo delle canne drenanti, elimina la quasi totalità delle portate filtranti nel corpo diga. La muratura della diga è praticamente asciutta ed in particolare lungo la superficie di contatto tra muratura e placca in calcestruzzo sul paramento di valle non sono presenti pressioni residue.
- Riduzione del carico di pressione sulla fondazione. Il diagramma delle pressioni al contatto tra fondazione e corpo diga nella *condizione originaria* ha una forma triangolare con pressioni residue elevate in prossimità del piede di valle. La presenza di uno schermo di iniezioni profondo nella fondazione al piede di monte della diga produce un'importante dissipazione del carico idraulico. A valle dello schermo la pressione residua ha un andamento costante parallelo al contatto con valori medi modesti.
- Riduzione delle portate filtranti in fondazione. Le portate specifiche totali nella fondazione al piede diga ed emergenti dal paramento di valle nella *condizione originaria* sono state stimate in circa 3.13 l/min /m. Nella *condizione di progetto* l'effetto combinato dello schermo di iniezioni, delle canne drenanti e dei dreni in fondazione produce una riduzione delle portate filtranti complessive pari ad un ordine di grandezza (0.3 l/min /m). In particolare, l'efficacia dei dreni contribuisce attivamente alla riduzione delle pressioni residue in fondazione, la portata specifica dei dreni è stata stimata in circa 0.28 l/min /m.

Gli interventi di risanamento previsti dal presente Progetto Definitivo determinano un regime idraulico desiderabile. Le pressioni e le portate attese nella fondazione sono accettabili e del tutto in linea con analoghi esempi di buona progettazione.